高速シリアル通信における ジッタの基礎と測定手法

～タイミング・マージンの減少は エラー発生の大きな要因

山中正樹

ジッタという言葉はさまざまな意味を持っています．例えば，プロトコル層ではパケットの到達間隔の揺らぎと定義され，物理層では信号の揺らぎと定義されています（アプリケーションによって信号周期の揺らぎだったり，理想的な信号からの揺らぎだったりする）．ここでは高速シリアル伝送の物理層で定義されているジッタについて説明します．（筆者）

Serial ATA（SATA），Fibre Channel（FC），PCI Express（PCIe）などに代表されるような高速ディジタル・シリアル通信においては，ギガ・ヘルツ帯域の信号が用いられています．このような高速信号を取り扱う上では，タイミング・マージンの減少はエラー発生の大きな要因となるため，ジッタ測定は各規格において重要な測定項目と

図1 アプリケーションごとに要求されているジッタの測定項目

要求されるジッタの項目はアプリケーションや伝送レートによって異なる．同じアプリケーションでも伝送レートが速くなればなるほど厳しいテストが要求され，テスト系も複雑になる傾向がある．

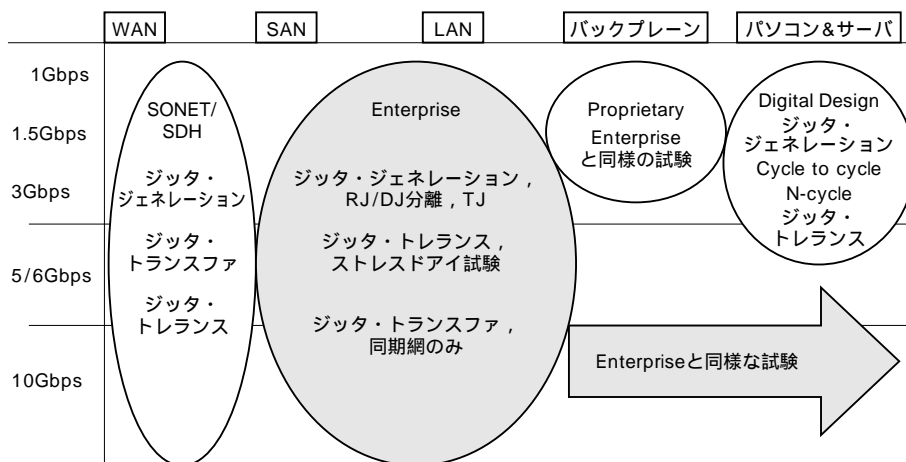
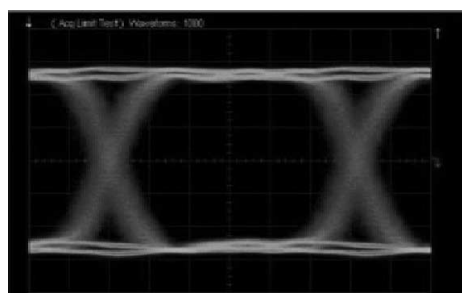
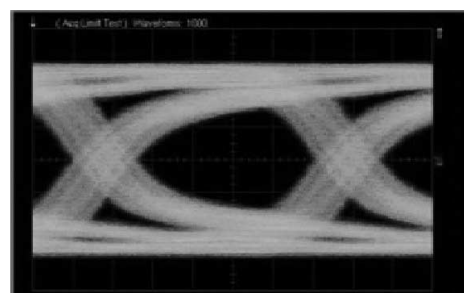
（a）クリーンに見える波形

（b）汚く見える波形

図2 どちらのアイ・ダイヤグラムが悪い波形なのか？

波形の品質評価によく用いられるアイ・ダイヤグラムを二つ示す．どちらも同じビット・レートであり，測定器も同じ設定である．右のアイ・ダイヤグラムの方が横軸も縦軸も閉じており，エラーが起こりやすい信号に見えるが….

KeyWord Cycle to Cycleジッタ，N-Cycleジッタ，周期・周波数ジッタ，データレート・ジッタ，TJ，RJ，DJ，デューティ・サイクル・ディストーション，インタ・シンボル・インタフェレンス，サブ・レート・ジッタ

なっています．

図1にアプリケーションごとに要求されているジッタの測定項目を示します．また，ジッタの発生要因や特性を理解することは，不具合個所の切り分けに大きく貢献することになるので，ジッタに対する知識がさまざまなアプリケーションで必要とされています．

図2にアイ・ダイヤグラムを示します．二つあるうちのどちらが悪い（エラーが発生しやすい）波形と思われるでしょうか．同じビット・レートであり，測定器の設定も同じです．アイ・ダイヤグラムを見る限り，右のアイ・ダイヤグラムの方が閉じたアイを示しているので，右が悪い波形だと思われる方も多いかと思います．実はこの例では右の方が良い（エラーが発生しにくい）アイ・ダイヤグラムになります．なぜ右の方が良いアイ・ダイヤグラムなのかは，後ほど説明します．

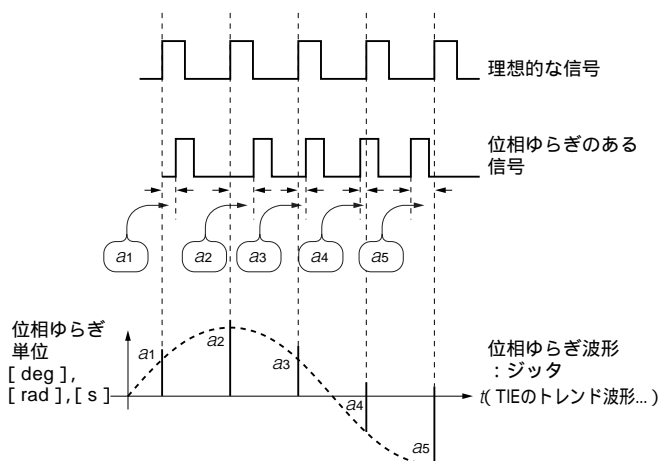



図3　ジッタの例，正弦波的に変動するジッタ

ジッタとはディジタル信号の位相（時間）揺らぎで，一般的には揺らぎの周波数が10Hz以上をジッタ，10Hzより低い周波数で変動する揺らぎをワンダと定義する．ジッタの単位はdeg，radの角度表示や，s，UIといった時間表示が用いられる．1UI＝1/ビット・レートである．例：10Gbpsの1UIは$1/10^{10}$＝100ps．

1．ジッタとは

ジッタはディジタル信号の位相（時間）揺らぎと定義されています． 一般的には10Hz 以上の揺らぎをジッタ，10Hzより小さい揺らぎをワンダと定義しています(1)．**図3**にジッタの例を示します．ジッタはさまざまな規格において定義されていますが，その評価手法は一つではなく測定手法や機器もさまざまです．

● 測定方法と測定器

表1に代表的な測定手法と測定器を示します．一般的にCycle to Cycleジッタや N-Cycleジッタ，周期・周波数ジッタは，クロック信号の短期，長期安定度の評価に用いられています．データレート・ジッタやTJ（total jitter），RJ（random jitter），DJ（deterministic jitter）は，データ信号のタイミング評価に用いられています．

上記パラメータの中でもDJとRJの分離，TJ測定は，高速ディジタル・シリアル通信において特に重要な測定項目です．DJ/RJ分離はTJを迅速に推定する目的や，ジッタ

表1　代表的なジッタ測定手法と測定器

ジッタの測定手法はさまざまであり，それに用いる測定器もさまざま．何を測定したいのかを踏まえた上で測定器を選択する．○は測定できる，△は条件による．

ジッタ解析ツール／ジッタの測定方法	リアルタイム・オシロスコープ	サンプリング・オシロスコープ	タイム・インターバル・アナライザ	BERテスタ	位相雑音アナライザ	SONT/SDHテスタ
アイ・ダイヤグラム	○	○	△	△		
バスタブ・カーブ	△	△	△	○		
外挿によるバスタブ・カーブ	○	○	○	○		
Cycle to Cycle/N-Cycle	○		○			
パラメータ・ヒストグラム	○	○	○			
時間対ジッタ（TIEのトレンド）	○	△	△			
ジッタFFTスペクトラム	○	△	△	○		
RJ/DJ分離	○	○	○	○		
DJ分離	○	○	○	○		
位相雑音		△	△		○	
振幅ノイズ分離		○			△	
ジッタ・ジェネレーション	△	△	△	△	○	○
ジッタ・トランスファ						○
ジッタ・トレランス				△		○
ワンダ	△	△			△	○

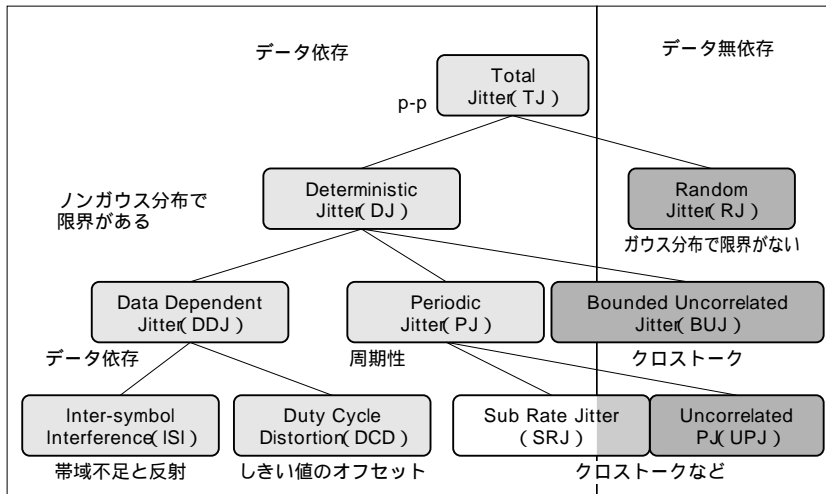



図4　ジッタの構成要素

ジッタにはさまざまな構成要素があり，データとは無依存に発生するRJ，データに依存して発生するDJに大きく分類される．DJはさらにBUJ，PJ，DDJに分けられ，PJはSRJ，UPJに分けられる．DDJはISI，DCDに分けられる．

BER	n
10^{-10}	12.7
10^{-11}	13.4
10^{-12}	14.1
10^{-13}	14.7
10^{-14}	15.3

$TJ = n \times RJ_{rms} + DJ$

図5　TJの考え方

RJは理論的には時間と共に増加する値のため，特定のBERで定義する必要がある(さまざまな規格において$BER = 10^{-12}$が採用されている)．低いBERまで実測するには時間がかかるため，多くの測定器ではRJの実効値を測定し，その値にBERに依存した係数を掛け算してRJの最大値を求めている．

によって発生している不具合解析の診断ツールとして使われます．TJ測定は符号誤り率(BER:bit error ratio)測定の代用として使われています(ジッタだけがBERに影響を与えると仮定した場合)．

● ジッタの構成要素と発生原因は多数ある

図4にジッタの構成要素を示します(ディジタル・アプリケーションでの定義)．RJは一般的にガウス分布に従い，観測時間を長くすればするほど，その最大値が大きくなる特性(Unboundedな特性)を持っています．一方，DJはさまざまなシステマティックな要因により発生し，その最大値は境界のある特性(Boundedな特性)を持っています．有限または無限の特性からTJは算出されるため，ある特定のBERでTJの値を定義しています．**図5**にTJの考え方[2]を示します．前述したように，ジッタにはさまざまな構成要素があり，それらの発生原因もさまざまです(**図6**)．

●デューティ・サイクル・ディストーション(DCD)

デューティ・サイクル・ディストーション(DCD：duty cycle distortion)は，ロジック'0'とロジック'1'のパルス幅の差で定義され，主に二つの発生原因があります．一つめはドライバ回路のしきい値にオフセットがある場合，二つめは立ち上がり/立ち下がり時間が非対称の場合です．

●インターシンボル・インタフェレンス(ISI)

インターシンボル・インタフェレンス(ISI：inter-symbol interference)は，立ち上がり/立ち下がり時間のばらつきで定義され，主に二つの発生原因があります．一

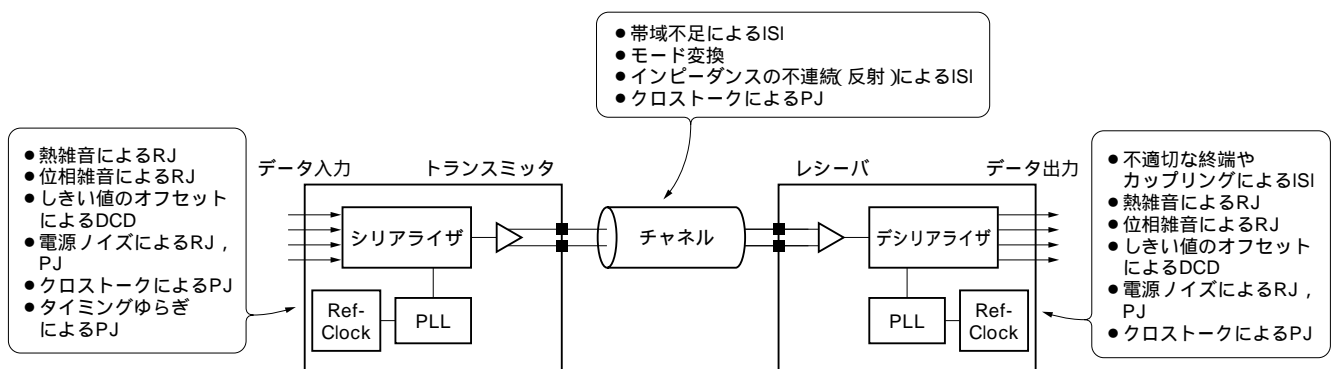



図6　ジッタの発生要因

ジッタはさまざまな要因で発生する．例えばRef Clockの位相雑音はRJ，channel(伝送路)の帯域が足りない，反射が多ければISI，しきい値レベルにオフセットが生じていればDCD，周期性を持った信号が伝送レーンにカップリングすればPJ，パラレル伝送路で信号間がカップリングすればBUJが発生する．

つめは伝送路の帯域不足によって立ち上がり/立ち下がり時間がばらつく場合，二つめはインピーダンスの不連続によって発生する反射によって立ち上がり/立ち下がり時間がばらつく場合です．DCD，ISIはデータ・パターンに依存して発生するため，データ・ディペンデント・ジッタ(DDJ)に区分されます．

●サブ・レート・ジッタ(SRJ)

サブ・レート・ジッタ(SRJ：sub rate jitter)は，データ・レートと関連した周期を持ったジッタ成分と定義されています．主な発生原因としては，分周または逓倍された基準クロックがデータ・レーンに干渉する場合と，MUX(mu1tip1exer)デバイスのパラレル・レーンに揺らぎがある場合です．例えば1:8のMUXデバイスにおいて，パラレル・レーン中の特定のレーンだけに揺らぎがある場合，シリアル側では8ビットごとにジッタが発生することになります．

●アンコリレート・ピリオディック・ジッタ(UPJ)

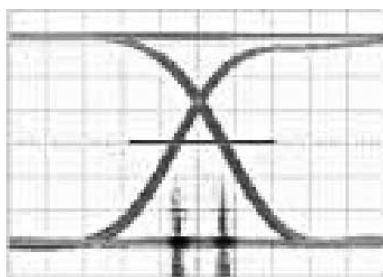
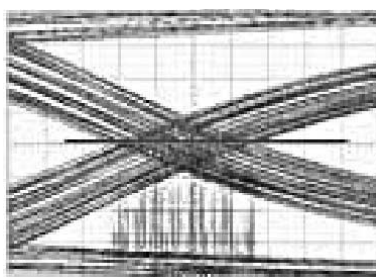
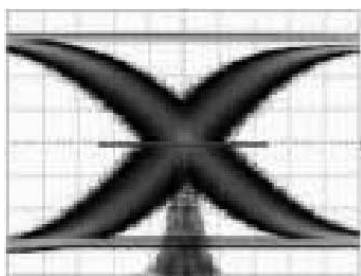
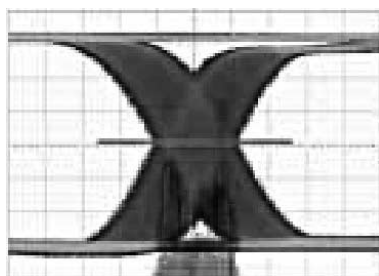
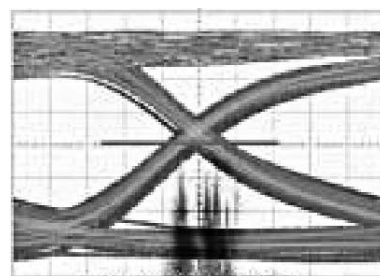
アンコリレート・ピリオディック・ジッタ(UPJ：uncor-

(a) DCD

(b) ISI

(c) RJ

(d) PJ

(e) DCD＋ISI＋RJ＋PJ

図7　ジッタのアイ・ダイヤグラム表示(しきい値50％におけるヒストグラム表示)

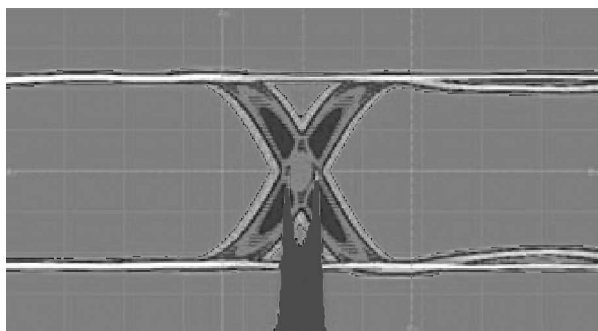
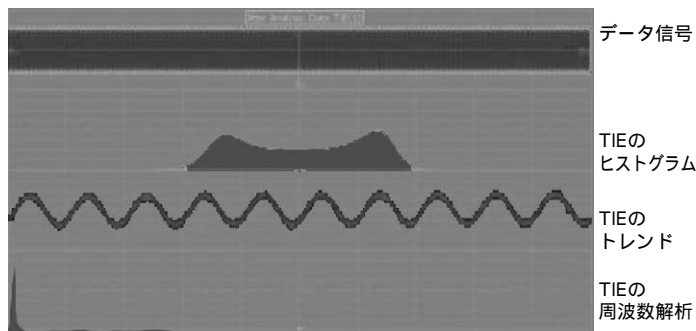
DCDのヒストグラムはクロスポイントの変動によって生じた二つのピークを示す．ISIのヒストグラムは立ち上がり/立ち下り時間のばらつきによって生じた複数のピークを示す．RJのヒストグラムはガウシアン分布を示す．PJのヒストグラムは周期的に変動する成分を示す．実際の信号は特定のジッタだけが存在するわけではなく，DCD，ISI，RJ，PJが混在したヒストグラムを示す．

(a) アイ・ダイヤグラムでのヒストグラム表示

(b) TIEのデータ，ヒストグラム，TIEの周波数解析

図8　アイ・ダイヤグラムとTIEの関係(PJが支配的な波形の例)

アイ・ダイヤグラム上でのヒストグラムを見ると，周期的に変動しているジッタ成分が存在していることは分かるが，この情報からはどんな周波数で変動しているのか分からないため，より詳細な解析を行うことはできない．TIE (time interval error)の時間変動を解析すれば，どのような周波数のジッタが存在しているのか分かる上，他の信号との時間相関を取りながら解析することが可能になるためトラブルシュートに有効なツールとなる．

related periodic jitter）は，データ・レートとは無関係な周期を持ったジッタ成分と定義されています．主な発生原因としては，電源のスイッチング周波数がデータ・レーンに干渉する場合です．

アイ・ダイヤグラムで各ジッタの比較を行うと特徴がよく分かります．**図7**にジッタのアイ・ダイヤグラム表示を示し，**図8**にアイ・ダイヤグラムとTIE（time interva1 error）の関連を，PJが支配的な信号を例に示します．

● 図2のアイ・ダイヤグラム，どちらが悪いか

ここで**図2**を見直してください．各アイ・ダイヤグラムのジッタはどのような成分で構成されていたでしょうか．各アイ・ダイヤグラムのジッタ測定値を**図9**に示します．TJの値を見るとクリーンに見える波形の方が悪い値を示していることが分かります．これは左側のアイ・ダイヤグラムにおいてRJ_{rms}の値が11.06psとなっており，右側のアイ・ダイヤグラムにおける2psと比べて大きいためです．**図5**で示した通り，RJ_{rms}の値に14.1という係数を掛け算することによって，$BER = 10^{-12}$におけるRJを算出できますから，RJ_{rms}の値が1ps異なると$BER = 10^{-12}$におけるRJの値は14.1ps異なることになります．この例では約9ps程度RJ_{rms}値に差がありますから，10^{-12}でRJを観測すると約127psの差が生じることになります．DJの差は約90psなので，右側のアイ・ダイヤグラムのDJ値よりも左側のクリーンに見えるアイ・ダイヤグラムのRJ値が大きいため，結果的に左側のアイ・ダイヤグラムの方がジッタが悪い（エラーが起こりやすい）という結論に至ります．

2．各種のジッタの測定法

ジッタ測定は，ジッタ・ジェネレーション（発生），ジッタ・トランスファ（伝達），ジッタ・トレランス（耐力）の3種類に分類され，おのおの測定法が規格で決められています[(3)(4)]（**図10**）．

■ ジッタ・ジェネレーションの測定法

● アイ・ダイヤグラム

オシロスコープを用いてアイ・ダイヤグラムを観測する方法で，アイ・ダイヤグラムのクロスポイントでヒストグラム解析する手法や，規定のマスクに波形が抵触するか確

（**a**）図2（a）の波形の解析結果

（**b**）図2（b）の波形の解析結果

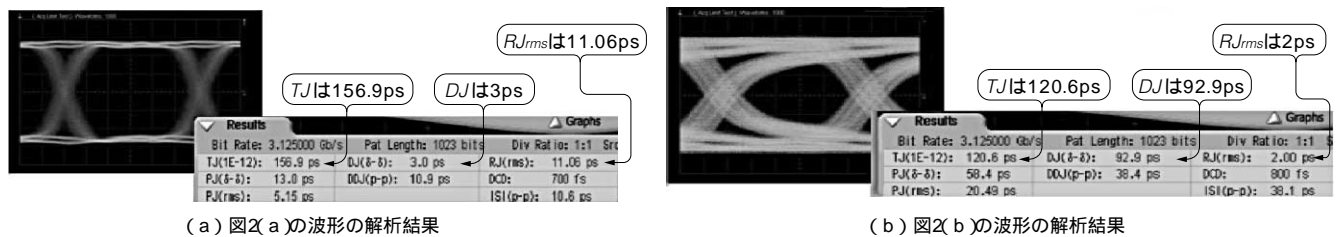



図9　図2のジッタ成分

TJの値を見ると，一見，クリーンに見えるアイ・ダイヤグラム（a）の方が悪い値を示していることが分かる．各成分を見ていくと，（a）のアイ・ダイヤグラムは$RJ_{rms} = 11.06$ps，$DJ = 3$ps，（b）のアイ・ダイヤグラムは$RJ_{rms} = 2$ps，$DJ = 92.9$psとなっている．RJ_{rms}の値が1ps異なると$BER = 10^{-12}$におけるRJの値は14.1ps異なることになる．この例では約9ps程度RJ_{rms}値に差があるため10^{-12}でRJを観測すると約127psの差が生じる．DJの差は約90psであり，汚く見える（b）のアイ・ダイヤグラムのDJ値よりクリーンに見える（a）のアイ・ダイヤグラムのRJ値が大きいため，結果的に（a）の方がジッタが悪い（エラーが起こりやすい）という結論になる．

（**a**）ジッタ・ジェネレーション　（**b**）ジッタ・トランスファ　（**c**）ジッタ・トレランス

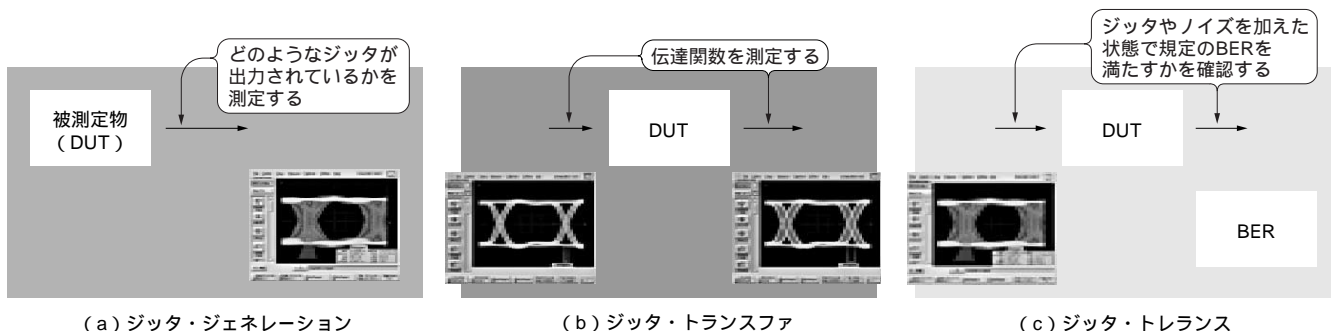



図10　ジッタ測定の種類

ジッタの測定は大きく三つに分類できる．ジッタ・ジェネレーション（発生）はデバイスからどのようなジッタが出力されているかを評価する．ジッタ・トランスファ（伝達）は入出力を持つデバイスのジッタ伝達関数を測定する．ジッタ・トレランス（耐力）はDUTがどのようなジッタに耐えられるかを評価する．

認するマスク評価があります(**図11**).最も直感的でジッタ特性の全体像を把握するのに適していますが，DJ/RJなどのジッタ成分を詳しく解析することはできません．RJの値は時間と共に増加する成分になるので，測定時間によって値が変わってしまうという問題点があります．

また，アイ・ダイヤグラムを測定するためには，データ信号とは別にクロック信号が必要となり，このクロック信号は直接入力するか，データ信号からクロック再生する必要があります．再生クロックの場合，クロック・リカバリ回路(CRU)のループ帯域幅が観測波形(ジッタ)に影響するため注意が必要です(**図12**).データコムの規格では，bitrate/1667，テレコムの規格ではbitrate/2500という値が一般的に使われています．

なお，データコムとは，Fibre Channelやギガビット・イーサネットのような，主にデータ通信を目的としたアプリケーションを想定しています．テレコムとは，SONET/SDHのような主に音声通信を目的としたアプリケーションを想定しています．

RJをガウス分布と仮定してヒストグラムにフィッティングをすることにより，DJ/RJ分離を行う手法もありますが，ヒストグラムの形状，フィッティングの手法によってはDJ/RJの分離を誤る可能性があるので注意が必要です．

● バスタブ・カーブ(Bathtub Curve)

バスタブ・カーブとは‘0’，‘1’の判定におけるしきい値によるエラー発生確率(累積確率分布)を示したものです．測定にはBERT(bit error ratio tester)による直接測定法，オシロスコープなどを用いた間接測定法(確率密度から累積分布に)があります．

この手法もRJをガウス分布と仮定してバスタブ・カーブにフィッティングをすることにより，DJ/RJ分離ができます(**図13**).

BERTを用いて長時間のBERを測定することにより，例えば10^{-12}までのBER測定を行い，バスタブ・カーブの測定をすれば，外挿ではない「真のTJ」を求めることができます．しかし，低いBERまで実際に測定することは時間がかかるため，短時間でのバスタブ・カーブから，外挿によりTJを求める方法がよく行われています．

外挿ではない「真のTJ測定」は，外挿を用いる各種測定法の信頼性を評価するためによく使われています．アイ・

(**a**) ヒストグラム評価

(**b**) マスク評価

図11
アイ・ダイヤグラムによるジッタの評価
アイ・ダイヤグラムによる評価は直感的で波形品質の特徴を定性的に把握することは可能であるが，ジッタの分離解析や不具合解析には向かない．

(**a**) CRUのループ帯域幅6MHz

(**b**) CRUのループ帯域幅50kHz

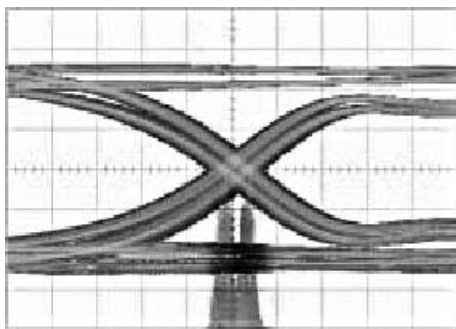
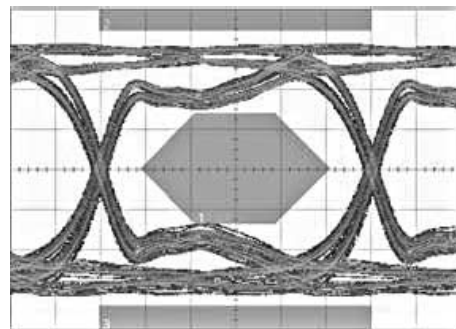
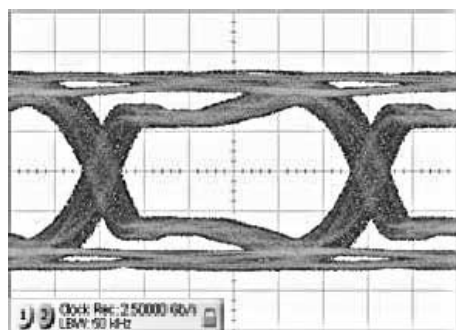



図12
クロック・リカバリ回路のループ帯域幅による観測波形の差
クロック・リカバリ回路(CRU)で再生したクロックを使う場合，ループ帯域幅により観測される波形が変わるので注意が必要．デバイスの出力している波形を評価する場合はできるだけ狭帯域に設定する．規格適合テストあるいは疑似受信機として使用する場合は規格で規定されている帯域またはレシーバの仕様に合わせる必要がある．

ダイヤグラムの評価と同じように，測定に再生クロックを用いる際はCRUのループ帯域が観測されるジッタに影響を与えるので注意が必要です．

なお，CRUとは，clock recovery unitの略称で，データ信号からクロックを再生するものを指します．高速ディジタル・シリアル通信においては，データとクロックを併走させて伝送せず，データのみ伝送させ，レシーバで受け取ったデータからクロックを再生し‘1’と‘0’を判定しています．

図13　バスタブ・カーブによるDJ/RJ分離，TJ測定
バスタブ・カーブは縦軸がBER，横軸がサンプリング・ポイントを表しており，各サンプリング・ポイントにおけるエラーの発生確率を示す．バスタブ・カーブのすそ野はRJが支配的な領域であるため，ガウシアン・カーブをフィッティングしDJ/RJを分離している．バスタブ・カーブの測定結果がバスタブ形状をしているため，この名が付いている．

● 時間領域

測定パラメータとしては，Cycle to Cycleジッタ，N-Cycleジッタ，TIEなどがあり(**図14**)，オシロスコープやTime Interval Analyzer(TIA)などで測定します．

Cycle to Cycleジッタは，クロックの隣り合う周期の差で定義されています．N-CycleジッタはクロックのN-Cycleを一つのグループとし，隣り合うグループの周期差で定義されています．

TIEは理想的なエッジからのずれでジッタが定義されています．測定器は多くの時間領域でのTIEの結果をもとに独自の解析アルゴリズムを適用させ，DJ/RJ分離，TJ推測を行っています．また，一部の測定器では縦軸ノイズの解析を振幅方向のTIEから解析できるものもあります．TIEの評価では，理想的なクロックの定義が，他の測定法と同じように観測されるジッタに大きな影響を与えます．

オシロスコープやTIAでBER解析ができると宣伝している測定器もありますが，あくまでもジッタやノイズの値から推測しているだけに過ぎず，決してBERTの代用になるものではないので注意してください．BERの値を信頼性高く評価するためには，やはりBERTが必要になります．

● 周波数領域

ジッタは理想的な信号からの位相の揺らぎとして考えることが可能です．現実世界では位相の揺らぎはさまざまな周波数(揺れ動きの速さ)成分で構成されているため，スペクトラム・アナライザや位相雑音測定器を用いてジッタの

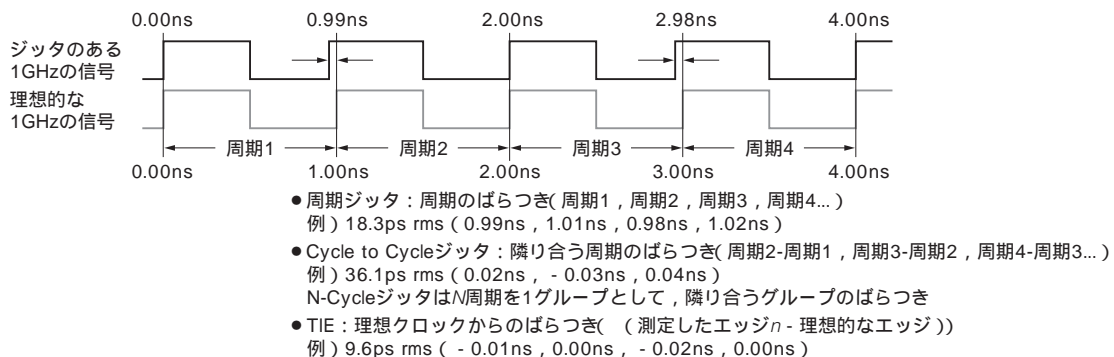



図14　各種時間領域での測定
Cycle to Cycleジッタは隣り合う周期の差で定義され，N-CycleジッタはN周期をグループとし，隣り合うグループの時間差で定義されている．TIE(Clock/Data)は基準となる信号のエッジと実測された信号のエッジの時間差で定義されている．TIEでの評価は基準クロックが重要となるため，目的に応じた基準クロックを設定する必要がある．多くの測定機はTIEのデータを解析し，ジッタ周波数やDJ/RJの分離を行っている．

周波数分布を評価すれば，ジッタの原因解析やトラブルシュートに利用できます（**図15**）．

位相雑音測定器によるジッタ解析では，他のジッタ測定法では測定できない超低ジッタ量を測定できるため，水晶発振器のような高安定なデバイスの評価に適しています．位相雑音を規定の周波数範囲で積分することにより，位相雑音を「ジッタrms」実効値に変換することが可能となります（**図16**）．最近ではサンプリング・オシロスコープやTIAで位相雑音を測定できるシステムもありますが，位相雑音測定器と比べるとダイナミック・レンジが低いため，位相雑音が比較的大きいディジタル・コンシューマ用途のデバイスが評価対象となります．

■ ジッタ・トランスファの測定

ジッタ・トランスファとは，ジッタの伝達関数のことであり，主にクロック・リカバリ回路（CRU）で用いるPLL（phase locked loop）の特性評価に用いられます．入出力におけるジッタ振幅とジッタ周波数の関係を示しています（**図17**）．

特定のジッタ周波数だけが強調されていないか，設計した通りのカットオフ周波数（ループ帯域）になっているのかなどを確認します．特にSONET/SDHのような同期系アプリケーションにおいては，重要な測定項目の一つです．

デバイスへ入力したジッタをJ_{in}，デバイスから出力されたジッタをJ_{out}とすると，ジッタ・トランスファは$20\log_{10}(J_{out}/J_{in})$で表現されます．測定系としては任意のジッタを出力できるパルス・パターン発生器（PPG）と，ジッタ値を解析するスペクトラム・アナライザやオシロスコープで構成されます．

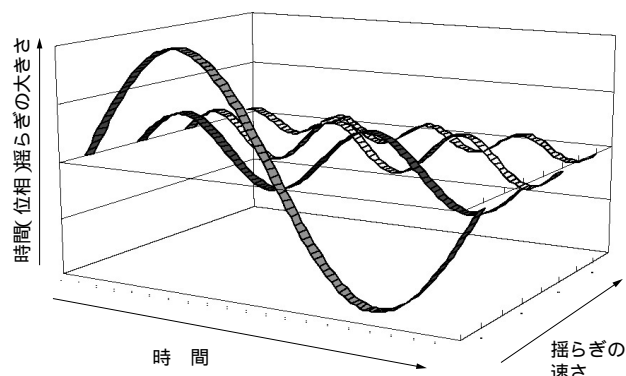



図15　ジッタ（位相揺らぎの大きさ）の周波数成分（揺らぎの速さ）
ジッタはさまざまな周波数成分を持っている．この周波数成分を解析することによりRJの周波数分布（帯域）や特定の周波数にピークがあるかどうかを観測できるため，トラブルシュートに有効な解析手段である．

■ ジッタ・トレランスの測定

どれだけのジッタに耐えられるかを測定する耐力テストで，ジッタ振幅や周波数，各種ジッタ成分を変化させ，エラーが発生するかを確認します（**図18**）．主にレシーバ側のテスト項目であり，PLL（CRU）がどこまでジッタに追従できるのかを確認する手法で，PLL（CRU）のループ帯域が測定結果に大きく影響を与えます．

以前はSONET/SDHが主な測定対象でしたが，最近では高速ディジタル・アプリケーションでも必須の測定項目となっています．測定系としては任意のジッタが出力可能なBERTが必要になります．

■ 伝送路の特性評価

伝送路の反射や帯域不足はジッタを発生させます．伝送路の帯域不足は信号の立ち上がり/立ち下がり時間を，パ

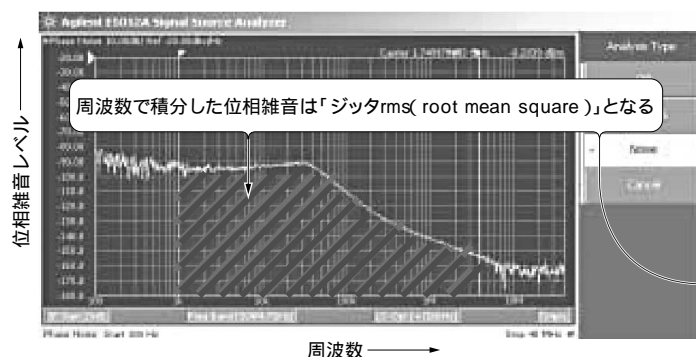



図16　位相雑音とジッタ
ジッタは位相の揺らぎと定義されており，位相雑音の一種である．位相雑音を周波数で積分することにより「ジッタrms」を算出できる．積分する周波数の範囲は何を目的にするかで変わる．オシロスコープとの相関を考えるのであれば，オシロスコープが観測可能な周波数範囲（最大記録時間と分解能から計算）に合わせる必要があるし，システムの能力を観測するのであれば，ジッタの伝送帯域（主にPLLのループ帯域に依存）に合わせる必要がある．

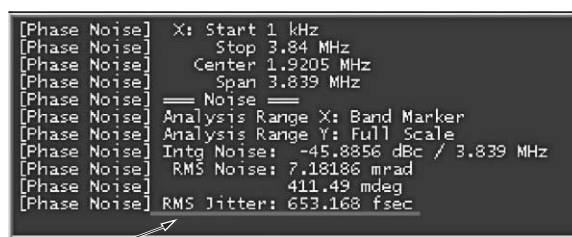
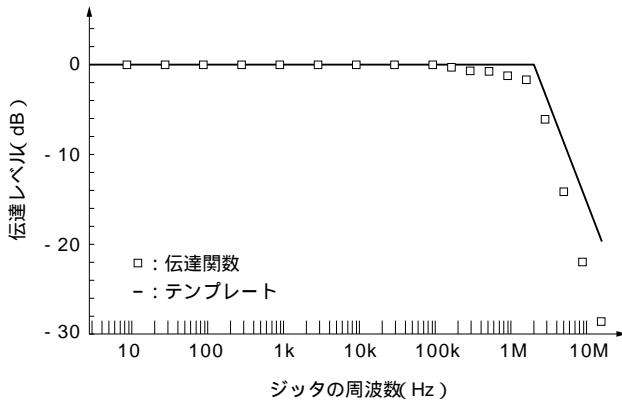



図17 ジッタ・トランスファ

ジッタ・トランスファはジッタの伝達関数のこと．ジッタの周波数を横軸，伝達関数を縦軸にプロットしたグラフになる．このグラフより，ジッタが増幅されないかなどを評価する．各種規格において伝達関数のテンプレート(形状)が規格化されている．

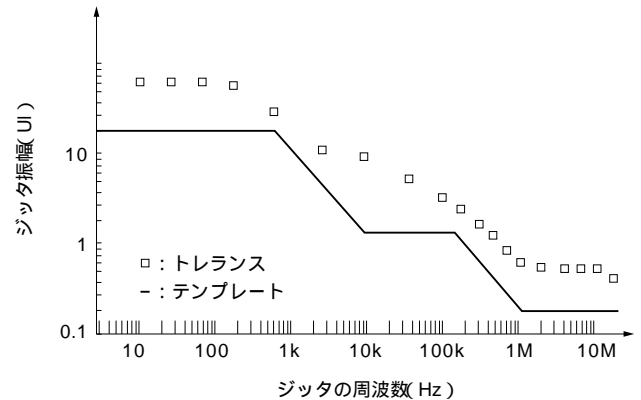
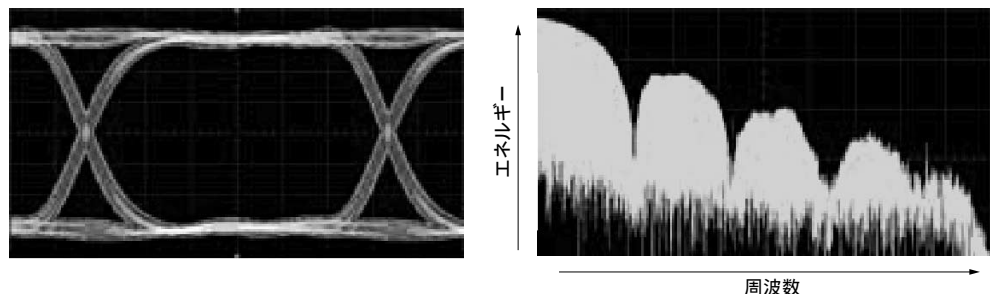



図18　ジッタ・トレランス

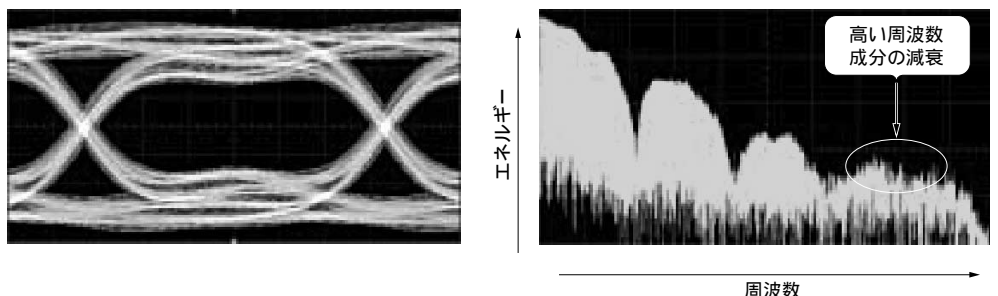
ジッタ・トレランスはジッタの耐力をテストする．横軸はジッタ周波数，縦軸がジッタ振幅になっており，設定したジッタ周波数・振幅で決められたBER(通常は1×10^{-12})の値を満たせばpass，満たさなければfailというテストになる．各種規格において伝達関数のテンプレート(形状)や加えるジッタの種類，値が規格化されている．

ターンに依存して変化させるためジッタが発生します．先行するビットの状態によって立ち上がり/立ち下がり時間が変動します．例えば，‘00001111’というパターンと，‘01010101’というパターンでは，立ち上がり/立ち下がり時間が異なります．さらに，不適切なインピーダンスでの終端やインピーダンスの不連続部分により発生する反射もジッタとして現れます．主に伝送路での反射や帯域不足はISI成分になります．**図19**に伝送路に反射や帯域制限がある場合の波形と伝送信号の周波数特性を示します．

伝送路の特性評価は，時間領域で測定するTDR(time domain reflectometry)や，周波数領域で測定するVNA(vector network analyzer)で行います．どちらの測定器もFFTなどの処理により時間領域や周波数領域における反射特性と伝達特性の評価が可能です．時間領域での評価は反射や損失の大きさを，時間，場所に対して表示します．周波数領域における評価は反射，損失の大きさを，周波数

(**a**) 伝送前の波形と周波数特性

(**b**) 伝送後の波形と周波数特性

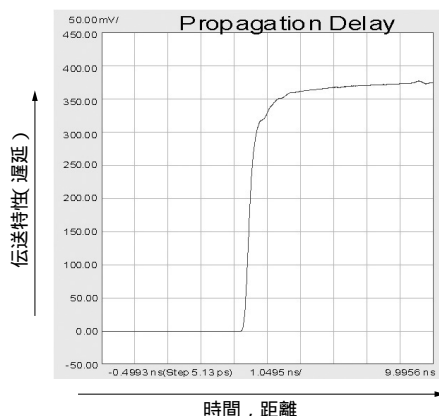
図19
伝送路の反射と帯域制限による波形

反射，帯域制限のある伝送路の伝送前後の波形を比較すると，立ち上がり/立ち下がり時間のばらつきや波形のひずみが観測されており，周波数分布も高周波の減衰や周波数ひずみが観測されていることが分かる．伝送路の反射や帯域制限は波形ひずみ(ジッタ)を発生させるため，伝送したい信号に合わせて伝送路を選択する必要がある．

に対して表示します．

解析対象にもよりますが，分解能やダイナミック・レンジが必要な場合はVNA，簡易に計測したい，信号源と組み合わせて波形の評価がしたい場合はTDRという選択になります．

図20に時間領域，周波数領域での測定を示します．

3．測定器がジッタに与える影響

オシロスコープを使ってジッタを解析する際は，ハードウェアの性能を十分に見極めた上で使用する必要があります．ハードウェアの振幅や位相に対する周波数特性，ノイ

(a) 時間領域での伝送特性

(b) 時間領域での反射特性

(c) 周波数領域での伝送特性

Differential Return Loss

反射特性(Sパラメータ)

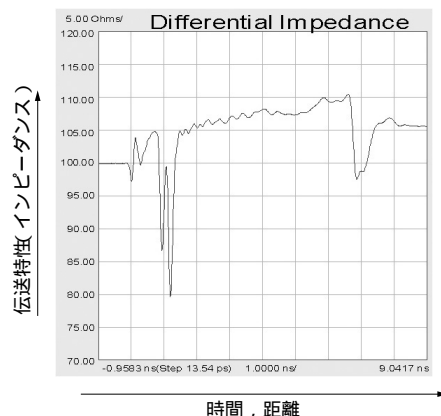
周波数

(d) 周波数領域での反射特性

図20 伝送路の特性評価

伝送路の反射，帯域制限を評価する際は，時間領域，周波数領域の両方で行うのが望ましい．時間領域では反射の場所や波形ひずみ，伝搬遅延といった問題を考察することができ，周波数領域では物理量に関連する伝送路の問題を考察することが可能．周波数領域での評価では振幅に関する評価以外に位相特性の評価も重要になる．特定の周波数だけ位相が遅れると，波形ひずみを発生させる．

(a) 縦軸ノイズ　Vrms　1mVの測定器でRJ/DJ分離した例

(b) 縦軸ノイズ　Vrms　6mVの測定器でRJ/DJ分離した例

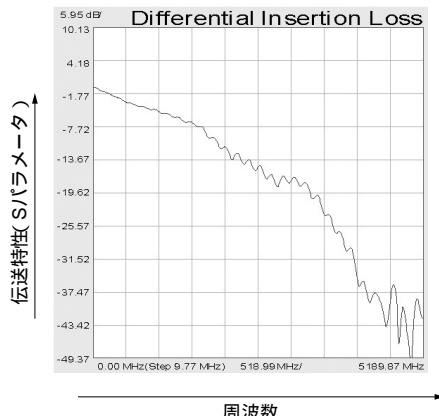
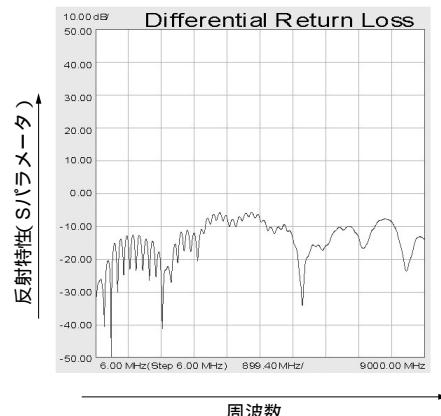



図21 ノイズ・フロアの差によるジッタ測定への影響

PPGからSATA相当の信号を出力させ，ノイズ・フロアの異なるオシロスコープで評価した結果，RJ値に差が出ていることが分かる．RJはその値を約14倍した値がRJ (a1 × 10^{-12})になるため，1psの差でもTJ (a1 × 10^{-12})は14psの差となるため注意が必要．

ズ特性，ハードウェアでトリガをかける場合はトリガ・ジッタ，プローブを使う際はプローブも含めた特性などです．ハードウェアの性能は観測波形に大きな影響を与えるため，ジッタ測定にも大きな誤差を与えることになります．

例としてノイズ特性の差によるジッタ測定への影響を示します（**図21**）．縦軸のノイズは，信号のスルー・レート（V/s）と関連してジッタに変換されます．ノイズがゼロの測定器は世の中に存在しないので，低ノイズの測定器を選択する必要があります．前項でも述べましたが，クロック・リカバリ回路（CRU）を使う際はループ帯域が観測波形に影響を与えるので，目的にあったループ帯域や形状に設定する必要があります（**図12**）．

DJ/RJ分離，TJ推測が可能な測定器は，ハードウェアの性能に加えて，ソフトウェア処理により信頼性はいちじるしく低下します[5]．ジッタの完全なる標準器は世の中に存在しないので，誤差の議論は難しくなりますが，BERTのTJ実測値と各測定器のTJ推測値を比較すれば，その測定器が正しく分離・解析できているか判断することは可能になります．

4．まとめ

ジッタには大きく分けて三つの測定項目があります．

ジッタ・ジェネレーションはデバイスから出力されているジッタの値を観測する評価項目で，ヒストグラム解析，バスタブ・カーブ，TIE，DJ/RJ分離・TJ推測などの手法があります．

ジッタ・トランスファはジッタの伝達関数を観測する評価項目で，デバイスに入力したジッタと出力されたジッタを比較して伝達関数を求めるテストで主にCRUの性能を検証するテストです．

ジッタ・トレランスはデバイス（レシーバ）の耐力を観測する評価項目で，各種ジッタ成分やノイズを印加した状態で規定のBERを満たすか確認するテストです．

三つの項目すべてに言えることですが，規格テストであれば規格書に沿った内容で評価する必要がありますし，規格テストでないのであれば，デバイスがどのようなものなのか考慮した上で，評価手法や測定器を検討する必要があります．また，デバッグ目的であれば複数の評価手法や測定器を組み合わせた測定方法が必要になります．

本稿では具体的な紹介はしていませんが，ギガ・ヘルツの信号を取り扱う上では，高周波計測のノウハウが必要になりますし，流行のアプリケーションでは最新の技術と評価動向をおさえておく必要があります．

参考・引用*文献

(1) D. B. Sullivan, D. W. Allan, D. A. Howe, F. L. Walls, “Characterization of Clock and Osci-llators”, NIST Technicalnote1337, 1990.
(2) Ransom Stephens ; “Jitter analysis : The dual-Dirac model, RJ/DJ and Q-scale,” Agilent Technologies Whitepaper, 2004.
(3) “Understanding Jitter and Wander Measure-ments and Stan dards, Second Edition”, Agilent Tutorial, Agilent Literature number 5988-6254EN, 2003.
(4) “Jitter Analysis Techniques for High Data Tates”, Agilent application note 1432, Agilent Literature number 5988-8425EN, 2003.
(5) Ransom Stephens, Brian Fetz, Steve Draving, Joe Evangelista, Michael Fleischer-Reumann, Greg LeCheminant, Jim Stimple ; Comparison of Different Jitter Analysis Techniques With a Precision Jitter Transmitter, DesignCon, 2005.

やまなか・まさき
アジレント・テクノロジー（株）

＜筆者プロフィール＞

山中正樹． 2002年からアジレント・テクノロジー（株）アプリケーション・エンジニアリング部にて主に光伝送，高速デジタル伝送の物理層評価を担当するアプリケーション・エンジニアとして日本全国を飛び回っている．